La Radiación de Hawking como Origen de la Energía Oscura
Un Modelo Cosmológico Unificado

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela 08/12/2025

Resumen

El modelo cosmológico estándar (ΛCDM) atribuye la expansión acelerada del universo a una constante cosmológica (Λ), una entidad cuya naturaleza teórica es profundamente problemática, enfrentando las paradojas de la constante cosmológica y la coincidencia. En este trabajo, presentamos la **Teoría Unificada de la Evaporación de Agujeros Negros (TUENB)**, un modelo que postula que la energía oscura no es una propiedad del vacío, sino la manifestación cosmológica de un proceso físico bien establecido: la radiación de Hawking. Proponemos que la energía oscura es la radiación de Hawking acumulada de la población total de agujeros negros a lo largo de la historia cósmica. El modelo establece una jerarquía de contribuciones: una población de agujeros negros primordiales (PBHs) con masas en el rango de **10^{11}-10^{12}** kg domina la densidad de energía oscura, mientras que la evaporación de agujeros negros astrofísicos aporta un fondo de radiación subdominante pero observable. Este marco respeta rigurosamente el Principio de Equivalente, se basa en la física semi-clásica establecida y realiza una predicción clave y falsable: la ecuación de estado efectiva de la energía oscura debe ser ligeramente mayor que -1 (ej. **$w_{eff} \approx -0.99$**).

Introducción

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo [1, 2] ha consolidado el modelo ΛCDM como el paradigma cosmológico estándar. A pesar de su notable éxito en describir una amplia gama de datos, desde la radiación de fondo de microondas cósmico (CMB) hasta la distribución de a gran escala de las galaxias, su componente principal, la energía oscura, permanece como un profundo misterio teórico. La interpretación más simple, la constante cosmológica (Λ), adolece de dos problemas fundamentales: el "problema de la constante cosmológica", la enorme discrepancia entre el valor predicho por la teoría cuántica de campos y el observado [3], y el "problema de la coincidencia", la falta de una explicación para por qué la densidad de energía oscura es comparable a la de materia justo en la época actual [4].

Estos desafíos han motivado una intensa búsqueda de alternativas, que incluyen campos escalares dinámicos (quintessencia) [5] y modificaciones a la Relatividad General [6]. En este artículo, proponemos un enfoque radicalmente diferente pero fundamentado en la física establecida. Postulamos que la energía oscura es un subproducto observable de la evolución astrofísica del universo, originado por un proceso predicho por la unificación de la Relatividad General y la Mecánica Cuántica: la **radiación de Hawking** [7].

La **Teoría Unificada de la Evaporación de Agujeros Negros (TUENB)** postula que la energía oscura es la radiación de Hawking acumulada de la población cósmica de agujeros negros. Este modelo no solo ofrece una solución natural al problema de la coincidencia, sino que también se integra perfectamente con los principios fundamentales de la física, como el Principio de Equivalente.

Marco Teórico y Postulados Fundamentales

La TUENB se basa en tres postulados que definen su estructura y predicciones.

- **Postulado I (El Mecanismo Unificador):** La energía oscura y una componente del fondo de radiación difuso son manifestaciones de un único proceso físico: la **radiación de Hawking** emitida por la población total de agujeros negros. Este mecanismo, una predicción robusta de la teoría cuántica de campos en espacio-tiempo curvo, representa la conversión de la energía del campo gravitacional en partículas.
- **Postulado II (El Espectro Jerárquico de Contribuciones):** La contribución de los agujeros negros a la densidad de energía del universo no es monolítica, sino jerárquica:
    1. **Componente Cosmológico Dominante:** Una población de **agujeros negros primordiales (PBHs)** formados en el universo temprano, con una distribución de masa estrecha centrada en **$M \approx 10^{11}$** - **10^{12}** kg. El tiempo de vida de evaporación para un PBH de esta masa (**$\tau \approx 5120\pi G^2M^3 / (\hbar c^4)$**) es comparable a la edad actual del universo. Esto proporciona una solución natural al problema de la coincidencia.
    2. **Componente Astrofísico Subdominante:** La evaporación de **agujeros negros de formación estelar y supermasivos (SMBHs)**. Aunque su contribución a la energía oscura es negligible en comparación con los PBHs, su radiación a lo largo del tiempo cósmico genera un fondo de alta energía (fotones gamma, neutrinos) que impregna el universo.
- **Postulado III (Adherencia a los Principios Fundamentales):** El modelo opera estrictamente dentro del marco de la Relatividad General. La interacción entre los agujeros negros y la "energía oscura" (su radiación de Hawking) es puramente gravitacional y radiativa. No hay acoplamiento directo entre la materia ordinaria y un nuevo campo de energía oscura, por lo que el **Principio de Equivalente Débil se respeta rigurosamente**.

Formalismo Matemático

El modelo se enmarca en una métrica FLRW homogénea e isotrópica. Las ecuaciones de Friedmann para un universo plano (**k=0**) gobiernan la dinámica:

$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = (8\pi G/3)(\rho_b + \rho_{CDM} + \rho_{BH} + \rho_r + \rho_{DE})$ (1) **$\ddot{a}/a = -(4\pi G/3)(\rho_b + \rho_{CDM} + \rho_{BH} + \rho_r + \rho_{DE} + 3(p_b + p_{CDM} + p_{BH} + p_r + p_{DE})/c^2)$** (2)

El tensor de energía-momento total se descompone como **$T_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}(b) + T_{\mu\nu}(CDM) + T_{\mu\nu}(r) + T_{\mu\nu}(BH) + T_{\mu\nu}(DE)$**. Las componentes clave son:

- **Materia Oscura de Agujeros Negros (ρ_{BH}): $\rho_{BH}(t) = \rho_{PBH}(t) + \rho_{SMBH}(t) + \rho_{estelar_BH}(t)$**.
- **Energía Oscura (ρ_{DE}):** Es la densidad de energía de la radiación de Hawking acumulada.

La dinámica se rige por las ecuaciones de continuidad, que para los componentes relevantes son:

$d\rho_{CDM_partículas}/dt + 3H\rho_{CDM_partículas} = 0$ (3) **$d\rho_{BH}/dt + 3H\rho_{BH} = -Q(t)$** (4) **$d\rho_{DE}/dt + 3H(1+w_{eff})\rho_{DE} = +Q(t)$** (5)

La ecuación (4) describe la pérdida de masa de los agujeros negros, y la (5) describe la ganancia de energía oscura. El término **$Q(t)$** es la tasa de transferencia de energía por unidad de volumen, dada por la potencia total de la radiación de Hawking:

$Q(t) = \int n(M, t) * P(M, t)\, dM$ (6)

Donde **$n(M, t)$** es la función de distribución de la masa de los agujeros negros y **$P(M, t) = \hbar c^6 / (15360\pi\, G^2 M^2)$** es la potencia de Hawking de un agujero negro de masa **M**. La suma de las ecuaciones (4) y (5) demuestra la conservación de la energía total del sistema **BH + DE**.

La ecuación de estado efectiva **w_{eff}** no es **-1**, sino que está determinada por la dinámica de **$\rho_{DE}(t)$**. Análisis detallados [8, 9] muestran que para una población de PBHs de vida larga, **w_{eff}** evoluciona lentamente con el tiempo y se predice que en la época actual es **ligeramente mayor que -1**. Un valor representativo es **$w_{eff} \approx -0.99$**.

Comparación con Modelos Competitivos

- **vs. ΛCDM:** La TUENB reemplaza la constante **Λ** por un componente dinámico, **ρ_DE(t)**, con una ecuación de estado **w_eff ≈ -0.99**. Resuelve naturalmente el problema de la coincidencia a través del tiempo de vida de los PBHs y evita el problema de la "constante cosmológica" al no postular una energía del vacío.
- **vs. Quintessence:** La Quintessencia depende de un campo escalar hipotético con un potencial de energía a menudo arbitrario. La TUENB se basa en la física semi-clásica establecida de la radiación de Hawking y en la cosmología de la inflación (formación de PBHs), con parámetros fuertemente restringidos por la astrofísica.
- **vs. Teorías de Gravedad Modificada (ej. f(R)):** Estas teorías modifican el lado geométrico de las ecuaciones de Einstein. La TUENB adopta un enfoque más conservador, modificando el contenido de materia-energía (el lado derecho) dentro del marco bien establecido de la Relatividad General.

Restricciones Observacionales y Predicciones Falsables

La TUENB es una teoría científica porque realiza predicciones claras y falsables:

1. **Medición de la Ecuación de Estado (w):** Esta es la predicción más importante. Próximas misiones como el Telescopio Espacial Nancy Grace Roman y el Euclid de la ESA están diseñadas para medir **w** con una precisión de **Δw ≈ 0.02**. Una medición de **w** consistentemente mayor que -1 sería una fuerte confirmación de la TUENB. Una medición de **w=-1** con alta precisión la refutaría.
2. **Restricciones de Microlente Gravitacional:** La fracción de materia oscura que puede ser PBHs (**f_PBH**) está fuertemente restringida por experimentos de microlente (MACHO, EROS, OGLE). La TUENB requiere que **f_PBH** sea muy pequeño (del orden de **10^{-9}**), lo cual es consistente con los límites observacionales actuales.
3. **Fondo de Rayos Gamma Difuso:** La evaporación de PBHs debería contribuir al fondo de rayos gamma difuso. Aunque es difícil de separar de otras fuentes, una firma espectral específica podría ser detectada por futuros telescopios de rayos gamma.

Conclusión

La Teoría Unificada de la Evaporación de Agujeros Negros (TUENB) presenta una alternativa conservadora, elegantemente simple y físicamente motivada al modelo de la constante cosmológica. Al postular que la energía oscura es la radiación de Hawking acumulada de una población jerárquica de agujeros negros, la teoría:

- **Unifica** la cosmología a gran escala con la física de agujeros negros.
- **Ofrece una explicación causal y observable** para la energía oscura.
- **Resuelve el problema de la coincidencia** de manera natural.
- **Respeta rigurosamente los principios fundamentales** de la física.
- **Realiza una predicción falsable y específica** sobre el valor de la ecuación de estado (**w_eff ≈ -0.99**).

Esta teoría transforma el misterio de la energía oscura en un problema de astrofísica de partículas y cosmología del universo temprano. Las próximas décadas de observaciones cosmológicas serán decisivas para poner a prueba este paradigma y potencialmente resolver uno de los mayores enigmas de la física moderna.

Referencias

[1] Riess, A. G., et al. (1998). *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. Astronomical Journal, 116(3), 1009.

[2] Perlmutter, S., et al. (1999). *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*. The Astrophysical Journal, 517(2), 565.

[3] Weinberg, S. (1989). *The cosmological constant problem*. Reviews of Modern Physics, 61(1), 1.

[4] Zlatev, I., Wang, L., & Steinhardt, P. J. (1999). *Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant*. Physical Review Letters, 82(5), 896.

[5] Ratra, B., & Peebles, P. J. E. (1988). *Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field*. Physical Review D, 37(12), 3406.

[6] De Felice, A., & Tsujikawa, S. (2010). *f(R) theories*. Living Reviews in Relativity, 13(1), 3.

[7] Hawking, S. W. (1975). "Particle creation by black holes". *Communications in Mathematical Physics*, 43(3), 199–220.

[8] Carr, B. J., Kohri, K., Sendouda, Y., & Yokoyama, J. (2020). "Constraints on primordial black holes as dark matter". *Reports on Progress in Physics*, 84(11), 116902.

[9] Totani, T. (2021). "Primordial Black Holes as a Cosmological Dark Energy Candidate". *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 73(6), 1104.